

空间激光通信中变步长 CMA-LMS 均衡算法

佟欣¹, 刘智^{1,2*}, 高思远¹

(1. 长春理工大学 电子与信息工程学院, 长春 130022; 2. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022)

摘要: 针对空间激光通信中无线光信号传输过程的串扰以及噪声问题, 提出一种结合恒模算法(CMA)和最小均方(LMS)算法的两级级联变步长自适应均衡算法——CMA-LMS 均衡算法, 使步长因子的大小在一定范围与理论呈非线性关系。利用理论数据和步长因子的乘积对算法变量进行更新, 实现信道的非线性自适应均衡。实验结果表明: CMA-LMS 均衡算法能够提高系统的性能; 在 16 阶正交幅度调制(16QAM)下, CMA-LMS 均衡算法能够有效抑制系统的噪声和串扰问题。

关键词: 自适应滤波; 空间激光通信; 均衡; 步长因子; 恒模算法

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)07-0036-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



CMA-LMS equalization algorithm with variable step size in space laser communication

TONG Xin¹, LIU Zhi^{1,2*}, GAO Siyuan¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, China;

2. Institute of Space Optics and Electronics, Changchun University of Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the crosstalk and noise problems of wireless optical signal transmission in space laser communication, combined with constant modulus algorithm (CMA) and least mean square (LMS) algorithm, a two-stage cascade variable step size adaptive equalization algorithm——CMA-LMS equalization algorithm is proposed, the size of the step factor has a nonlinear relationship with the theory in a certain range. The product of the theoretical data and the step factor is used to update the algorithm variables to achieve the nonlinear adaptive equalization of the channel. The experimental results show that the CMA-LMS equalization algorithm can improve the performance of the system, and under 16 quadrature amplitude modulation (16QAM), CMA-LMS equalization algorithm can effectively suppress the noise and crosstalk of the system.

Key words: adaptive filtering; space laser communication; equalization; step factor; constant modulus algorithm

0 引言

空间激光通信因其容量大、保密性好等优点被大量应用在深空探测以及星地通信等领域^[1]。由于光信号在传输过程中的码间串扰、背景光噪声以及中继放大噪声等影响会给信号带来严重损耗, 通过对信道均衡能有效地抑制信号间串扰以及噪声等影响^[2-3]。

收稿日期: 2019-12-04。

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20170521001HJ)资助。

作者简介: 佟欣(1994—), 女, 吉林九台人, 硕士生, 现就读于长春理工大学电子信息工程学院电子与通信工程专业, 主要研究方向为空间激光通信组网特性、线性串扰特性以及信道均衡研究, 并对具体的信道进行优化及仿真验证。

*** 通信作者:** 刘智(E-mail: liuzhi@cust.edu.cn)。



覃景繁等人^[4]借助 Sigmoid 函数开创性地对最小均方(LMS)算法提出了一种改变步长的算法, 但该算法复杂、计算量大。韩广超等人^[5]在 LMS 自适应滤波算法的基础上建立了补偿与误差的非线性关系模型, 其稳态误差和收敛速度都得到了提高, 但计算量大。D.N.Godar 等人^[6]提出恒模算法(CMA), 利用信号的统计特性对信道进行均衡, 可自动调整抽头系数, 提高信道效率和收敛速度, 但是算法对噪声敏感度不强, 信号易受到干扰^[7]。双模式盲均衡算法虽然能降低收敛的稳态误差^[8-10], 但这种算法收敛速度慢、算法切换不及时, 且误差大。因此, 本文针对空间激光通信光信号传输过程存在的串扰和噪声问题, 提出一种两级级联变步长自适应均衡算法, 即 CMA-LMS 均衡算法。

1 理论推导

为了提高均衡器的性能,可采用 CMA-LMS 均衡算法。通过将 CMA 与 LMS 算法相结合,达到有效改善信道质量的目的。CMA 可以有效减少信号传输过程中光信号之间的码间串扰问题;LMS 算法可以减少系统的稳态误差,通过动态地改变其步长因子 μ 的取值范围,能够有效地抑制信号传输过程中的噪声影响,使系统达到稳定。

1.1 CMA 与 LMS 算法级联方法

CMA 与 LMS 算法级联过程中,如何使 CMA 切换到 LMS 算法是重点研究的问题。现有的双模均衡算法(CMA-DDLMS)采用判决圆方法完成软切换^[1],这种方法的操作性差,误差高,不能有效地减少噪声。本文利用自适应切换的双模盲均衡结构^[12],将 CMA 和 LMS 算法进行凸组合,盲均衡算法在初始收敛阶段和当信号发生突变时,首先减小信号之间的串扰,当稳态误差在一定值时,再切换到变步长的 LMS 算法。其中稳态值由信道的环境所决定,可以由实验仿真得到阈值来切换到 LMS 算法。

1.2 变步长 CMA-LMS 均衡算法

变步长 CMA-LMS 均衡算法的核心思想是当信号经过第二级 LMS 均衡时改变 LMS 算法的步长,使算法按照期望的趋势变化。本文通过动态地改变步长因子,使算法根据信号动态调整步长,可以达到稳态误差变小且收敛速度快的效果。

由于 LMS 算法中的步长因子 μ_{LMS} 影响了算法的性能, μ_{LMS} 的取值范围为 $0 < \mu_{\text{LMS}} < 1/\lambda_{\text{max}}$ 。其中, λ_{max} 为相关矩阵的最大特征值, μ_{LMS} 越大其收敛速度越快,但是稳态误差变大;而 μ_{LMS} 越小其稳态误差虽然越小,但是收敛速度随之下降。因此,根据 LMS 算法中的函数 $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ 平移、翻转以及实验调节参数 α 和 β 后,本文对 μ_{LMS} 进行改进,改进的公式如下:

$$\mu(n) = \beta \frac{\frac{1}{5} e^{-\alpha |\text{erf}(n)|}}{1 + e^{-\alpha |\text{erf}(n)|}} \quad (1)$$

为了更好地体现本文所提出的变步长自适应 LMS 滤波函数中参数 α 与 β 的作用以及取值范围,通过实验分别验证及讨论参数 α 与 β 对系统的影响。其中,图 1 和图 2 分别为 α 固定、 β 变化以及 α 变化、 β 固定这 2 种情况下,变步长函数 $\mu(n)$ 与误差函数 $\text{erf}(n)$ 之间的关系曲线。

图 1 为 $\alpha=1$ 时, β 分别取 0.2、0.5、1.5 和 3.5 时的

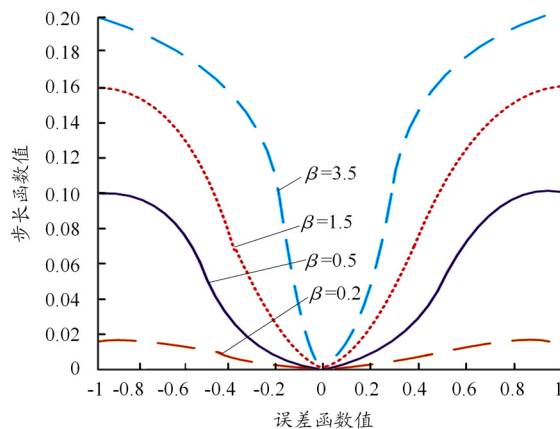


图 1 α 固定、 β 变化时,变步长与误差函数间的关系

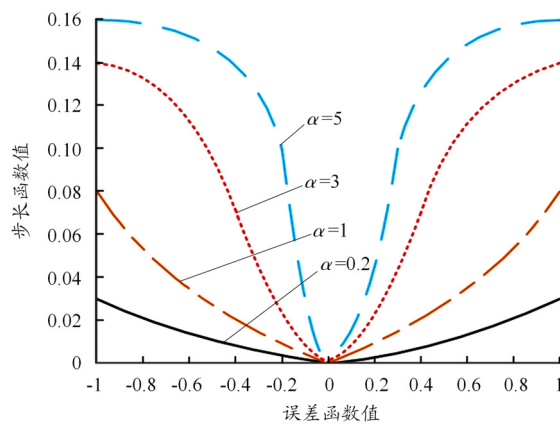


图 2 α 变化、 β 固定时,变步长与误差函数间的关系

变步长函数 $\mu(n)$ 与误差函数 $\text{erf}(n)$ 的关系曲线。可以看出,对于相同的初始误差, β 的取值越大,初始收敛速度越快。但是,若 β 取值过大,收敛后的误差函数对应的变步长函数 $\mu(n)$ 值也越大,会产生较大误差。因此,本文选取的值为 $\beta=0.5$ 。

图 2 为 $\beta=0.5$ 时, α 分别取 0.2、1、3 和 5 时的变步长函数 $\mu(n)$ 与误差函数 $\text{erf}(n)$ 的关系曲线。可以看出,对于相同的初始误差, α 取值越大,则收敛速度越慢,反之则收敛速度变快。但是随着 α 取值越大,则出现误差可能越大。综合图 1、图 2,本文选定 $\alpha=1$ 、 $\beta=0.5$,这样既可以保证曲线变化平缓,算法又能得到更高的稳定性。

2 仿真结果及分析

为了验证本文所提出的 CMA-LMS 均衡算法中的步长因子 μ 在收敛速度、稳定性和稳态误差方面的性能,以及在空间激光通信中光信号传输过程中噪声抑制的应用效果,本文利用仿真软件 Matlab 2018a 对变

步长 CMA-LMS 均衡算法进行了模拟仿真实验,并且将该算法在噪声消除上的应用效果与其它自适应滤波算法进行了对比。仿真条件操作步骤如下:

①选用 2 阶有限脉冲响应(FIR)横向滤波器;

②选用瑞利信道,其仿真信道的冲激响应为 $[-0.005 \ 0.009 \ -0.024 \ 0.854 \ -0.218 \ 0.049 \ -0.016]$ ^[11],选择输入的信号 $x(n)$ 为 16 阶正交幅度调制(16QAM)信号,输入信噪比为 30 dB,信号的平均功率为 1 dB;

③输入均值为 0,方差为 0.04 的高斯白噪声,此高斯白噪声信号在本次实验中代替空间光通信中的背景噪声以及放大器自发辐射噪声(ASE);

④分别设定变步长 CMA-LMS 均衡算法中 $\mu(n)$ 的初始值 $\alpha=1, \beta=0.5$,抽头系数为 6;

⑤设定 LMS 算法中的 $\mu=0.003$,抽头系数为 6;

⑥设定 CMA 的步长为 2^{-16} ;

⑦为了验证 3 种算法的收敛速度和收敛精度,分别对 3 种不同的算法做 200 次独立仿真并取采样点数为 1000,根据均方误差(MSE)对曲线做统计平均,最后得出学习曲线,并将 3 种算法的 MSE 曲线绘制在一张图里。3 种算法学习曲线如图 3 所示。同时,为了

验证算法均衡的性能,比较 3 种算法在均衡前后的星座图如图 4~图 6 所示。

从图 3 可以看出,在相同的仿真条件下,每个算法都可以随着迭代次数的增加逐渐收敛,其中本文提出的变步长 CMA-LMS 均衡算法在收敛速度、跟踪信号的能力明显优于普通 CMA 和 LMS 算法,并且当系统在第 500 个采样点时刻发生跳变时,本文的算法再次达到稳态时的速度也明显快一些并且平稳性较好。与 CMA 和 LMS 算法相比,变步长 CMA-LMS 均衡算法有较小的稳态误差,稳态误差的精度得到有效提高。

发送与接收端信号星座图分别如图 4、图 5 所示。可以看出,发送信号通过信道传输后,码间串扰以及噪声对其影响大,失真严重。在相同的信道条件下,本文分别仿真了传统的 CMA、LMS 算法和本文提出的变步长 CMA-LMS 均衡算法,对信号的收敛效果以及噪声抑制情况如图 6 所示。

图 6 中,蓝色的星座点代表均衡前的信号,黑色的星座点代表发射端发射的信号,绿色的星座点表示 16QAM 信号均衡后的信号。3 种算法都可以使 16QAM

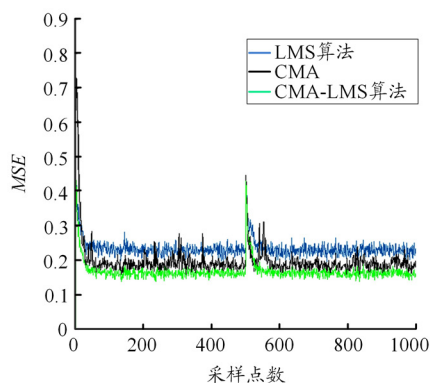


图3 3种算法学习曲线对比

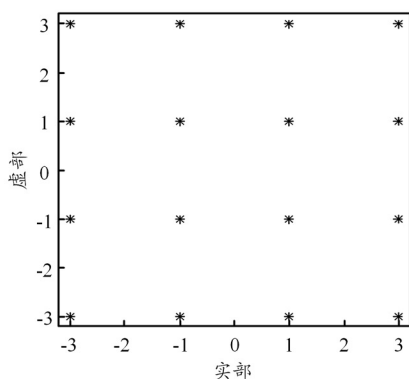


图4 发送端信号星座图

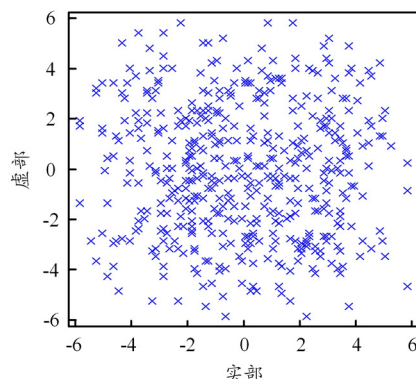
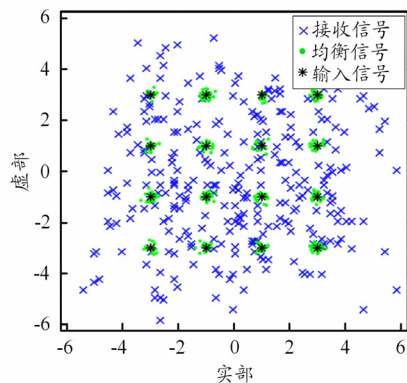
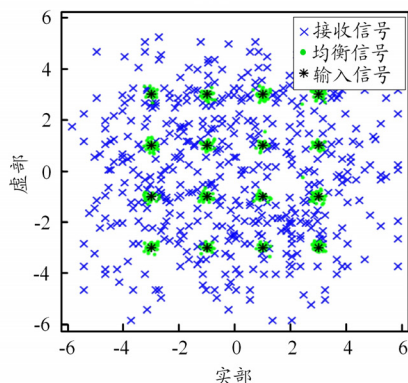


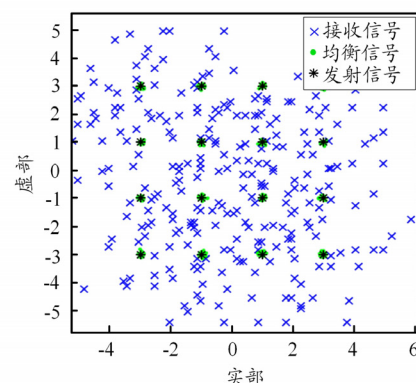
图5 接收端信号星座图



(a) CMA



(b) LMS 算法



(c) CMA-LMS 算法

图6 3种算法均衡效果对比

原信号收敛,但是 CMA 和 LMS 算法的噪声抑制效果不是特别理想。由此可见,本文提出的变步长 CMA-LMS 均衡算法的收敛效果以及噪声抑制方面优于 LMS 算法与 CMA。

3 结束语

针对空间激光通信中光信号传输产生的噪声问题,本文提出了一种新的改变步长 CMA-LMS 均衡算法,通过动态改变步长大小可以实现系统的快速平稳收敛。相关的仿真也验证了变步长 CMA-LMS 均衡算法具有良好的收敛速度与收敛精度,可以有效地抑制噪声对系统的影响,可用于空间激光通信光信号传输中的非线性信道均衡等场合。

参考文献:

- [1] 姜会林,付强,赵义武,等.空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J].物联网学报,2019,3(2):1-8.
- [2] 吕照顺,吴晗平,李军雨.改进的变步长自适应最小均方算法及其数字信号处理[J].强激光与粒子束,2015,27(9):1-5.
- [3] 曹志刚,钱亚生.现代通信原理[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [4] 覃景繁,韦岗.基于 S 型函数的变步长 LMS 自适应滤波算法[J].无线电工程,1996(4):44-47.
- [5] 韩广超,王锋.一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法及应用[J].中北大学学报,2017(2):140-144.
- [6] GODAR D N. Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimension Data Communication Systems [J]. IEEE Transaction on Communication, 1980, 28(9): 1867-1875.
- [7] 蔡理金.CMA 算法盲均衡性能分析[J].通信技术,2011,44(12):19-21.
- [8] WEERACKODY V, KASSAM S A. Dual-mode type algorithms for blind equalization[J]. IEEE Trans Comm, 1994, 42(1): 22-28.
- [9] 孙美倩,董韬,李兵兵.QAM 均衡器的设计与实现 [J].电视技术,2006(9):28-30.
- [10] HUANG K C, LIN D W. A hybrid variable step-size adaptive blind equalization algorithm for QAM signals [C]// Global Telecommunications Conference, November 28-December 2, 2005, Louis, USA. Louis: IEEE, 2005: 2140-2144.
- [11] 陈智君,詹亚峰,陆建华.基于概率软切换的两级双模盲均衡器[J].通信技术,2010(3):65-67.
- [12] 曾乐雅,许华,王天睿.自适应切换双模盲均衡算法[J].电子与信息学报,2016(11):2780-2786.

OPTINET
CHINA



2020中国光网络研讨会

中国FTTH论坛 数据中心光互联论坛

400GbE Optics Edge Computing SDN/NFV 5G OTN IoT
Data Center Interconnects Network Slicing Data Center PON Transponders
Coherent Technology

2020年8月26-27日 | 北京粤财JW万豪酒店 August 26 - 27, 2020 | JW Marriott Hotel Beijing Central | China

主办单位 Organizers

中国通信学会光通信专业委员会
Optical Communication Committee of
China Institute of Communications

工信部通信科技委传输与接入专家咨询组
The Expert Advisory Group in Transmission and Access,
Communications Science and Technology Committee, MIIT

承办单位 Co-Organizer



讯息展-世界展览服务有限公司



欲了解更多资讯, 敬请联系大会秘书处: For more information, please contact the Event Secretariat:

李应强 Peter Lee
电话 Tel: (852) 2865 1118
传真 Fax: (852) 2865 1129
电邮 Email: peter.lee@infoexws.com

王丽雅 Lydia Wang
电话 Tel: (86-10) 6277 1798
传真 Fax: (86-10) 6277 1799
电邮 Email: lydia.wang@infoexevents.com.cn



www.optinetchina.com